

Advanced applications established by MIRRORCLE type tabletop synchrotron light sources

H. Yamada^{1,2}, T. Hanashima², D. Hasegawa², T. Yamada², M. Yamada², Y. Yano¹, M. Mizuta¹

¹) Ritsumeikan University

1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu City, Shiga 525-0758

²) Photon Production Laboratory Ltd.

4-2-1-808 Takagaicho Minami, Omihachiman, Shiga 523-0898

Abstract

MIRRORCLE-CV4 及び CV1 が完成して様々な利用に供されているが、“みらくる”でしか行うことの出来ない特徴的な利用がクローズアップされている。例えば、マイクロCT、分散型 XAFS、微小角散乱実験、大型構造物の非破壊検査である。電子蓄積リングを戸外に持ち出し、実際の橋梁検査を行うことができた。電子蓄積リングを戸外に持ち出した世界で初めての例である。

1. はじめに

“みらくる”はさらに進化を続けている。電子エネルギー4MeV と 1MeV の“みらくる”が完成した。4MeV 装置を、MIRRORCLE-CV4、1MeV 装置を MIRRORCLE-CV1 と呼んでいる。CV4 の 100keV 領域に於ける X 線フラックスは、6MeV 装置より 5 倍強く、CV1 の 10keV 領域での強度は CV4 の 10 倍という結果が出ている。CV4 及び CV1 が X 線利用の実用マシンであり、CV4 は構造物の非破壊検査に優れ、CV1 は高度分析利用に優れている。CV1 の運転には、放射線主任者を必要としないのも大きな利点である。遮蔽も容易である。

“みらくる”の利用で、第1に注目されるのがマイクロCTである。マイクロフォーカス X 線管による CT が産業界では広く使われていて、1~10 μ m の焦点サイズをだしている。しかしながら、金属ケースに入った LSI や Li イオン電池の帯状電極の内部構造は透過力が不足して見ることが出来ない。

“みらくる”では、微小球状ターゲットに 6 μ m の金属を使用して、実効的に 3 μ m の解像度を出している。1 μ m ワイヤターゲットでファンビーム CT を行うと、サブミクロンの解像度を出すことができる。検出器の解像度が 10 ミクロンでも、20 倍拡大で、0.5 μ m を達成できる。“みらくる”の X 線スペクトルは、MeV 領域まで発生するので、上記のアプリケーションには適切である。

CV4 を用いた非破壊検査にはユーザーから多くのリクエストが来ている。橋桁の検査も一例である。60cm コンクリートに埋め込まれた、シース管の内部を詳細に見ることができる。

次に希望が多いのが、XAFS である。“みらくる”で行う XAFS は、分散型 XAFS であり、数 10keV の領域で 500eV のバンド幅を一度に測定できる。湾曲結晶を用いて、一つのスペクトルを 30 分ほどとることができる。大型放射光では波長をスキャン

しなければならないから、結局時間がかかる。30keV 以上の吸収端を見ることが出来るのが特長である。

微小角散乱では、ブロックコリメータを用いて、幅 60 μ m の X 線を取り出すことができる。大型放射光では、概ね 100 μ m のビームを切り出して微小角散乱を行っているが“みらくる”の光源点は、数 μ m のオーダーであるから、我々が行うのは微小角散乱と言って良い。XAFS 及び微小角散乱は、CV1 を用いて行うよう、現在準備を進めている。

2. MIRRORCLE-CV シリーズ

CV シリーズは、軌道半径が 6X の半分の 8cm である。リングは矩形であり、その一辺は 35cm である。永久磁石を使用して軽量化を図っているため、入射器のマイクロトロンを含めて総重量は、1t 以下に収めることができた。図1は完成した、MIRRORCLE-CV4 である。

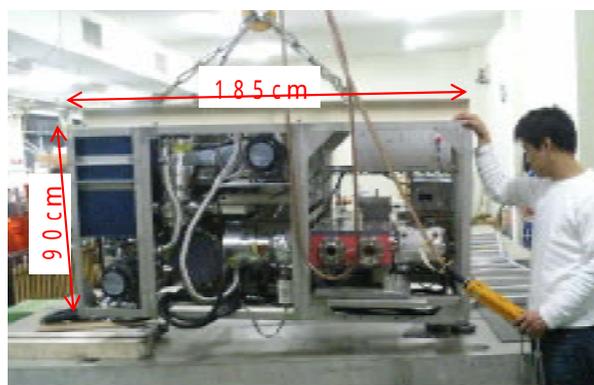


図1 MIRRORCLE-CV4

X 線強度について述べると、電子エネルギーが低いので 1/ ルールに従って、X 線の発散角が大きくなるため、光子密度が下がると考えて良いが、電子エネルギーが低い分マイクロトロンデューティを上げることができる。

CV1 は、現在パルス幅 100ns、繰り返し 1kHz で運転しているが、(株)光子発生技術研究所によるコマーシャルプロダクトは 10kHz となる。CV4 は、現在、500Hz であるが、10kHz にする予定である。

さらに最近マイクロトロン入射器の効率を著しく高めることができた。4MeV マイクロトロンでは、最大電流値 260mA を出している。1MeV マイクロトロンの電流値は、300mA であるが、理論的には 500mA 出すことができる。キャビティーのエージン

グが進み、Q 値が上がり、大パワーを投入できれば、さらに電流値を上げられると考えている。この電流値はライナックのそれと比較して著しく高い。我々は、Kapitza 型のマイクロトロンに収束要素を導入して加速効率を飛躍的に高めた。

ターゲットを挿入して発生した X 線強度を規格化された DOSE モニター (イオンチェンバー) を用いて計測した値を表 1 に示す。実測値に基づいて、10kHz 運転をしたときの値を示している。

表 1 X 線強度

model	Dose rate[mGy/min @1mdistance]			Xray target type	beam current, repetition, timing window
	Model #23342 soft xray (8 - 30 keV)	Model #31013 hard xray (< 150 keV)	Model #31013 hard xray (~1.3 MeV)		
CV1	6100	3200	18	Cu 30um foil	300mA, 10kHz, 100ns
CV4	344	979	1088	W 30um ball	200mA, 10kHz, 100ns,
6X	-	10	24	W 30um ball	120mA, 400Hz,
20SX	-	-	11	Be 100um thick sheet	120mA, 500Hz,

この表から分かるように、CV1 及び CV4 の X 線強度は 6X や 20SX と比較して著しく向上している。特に低エネルギー X 線成分が増加している。逆説的に述べるならば、高エネルギー電子を用いた場合の低エネルギー X 線強度が、理論で予測されたよりもかなり低かったことが問題と思われる。理由として、制動放射に於けるスクリーニング効果を上げることができる。高エネルギー電子ビームのスクリーニング効果は、実験的には必ずしも良く解明されていない。高エネルギー電子では、低エネルギー制動放射がかなり抑制されているようであり、物理の問題として興味深い。

この結果をもって、我々は、“みらくる”プロジェクトにおいて、やっと初期の目標を達成することができた。“みらくる”の X 線強度は、実用段階に到達した。CV4 は、高エネルギーの X 線強度から分かるように、重構造物の非破壊検査に優れており、自動車エンジンの内部を、10um の精度で非破壊検査ができ、CT で断層を見ることができる。CV1 の低エネルギー X 線強度は、分散型 XAFS で 1 つのスペクトルを数分でとることが出来る強度である。

3. X 線利用

3.1 非破壊検査

1MeV 以上の高輝度 X 線で、10um という解像度を出せる装置は、MIRRORCLE-CV4 以外には無い。その様な中で、安全・安心がキーワードとして登場し

たことと、リコールに対するリスクヘッジが生産技術に不可欠となったことにより、CV4 に対する期待が高まり、“みらくる”の利用希望者が増加している。以下に、幾つかの特徴的な非破壊検査例を紹介する。

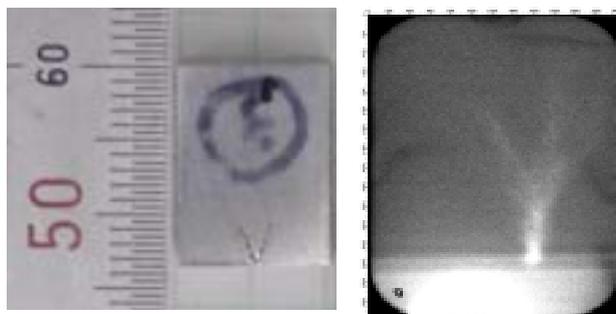


図 2 1.5cm 鋼板に人工的に形成したクラック (左図) を約 3 倍拡大で透視した (右図) 物である。表面に見られる以外のクラックが多数見えている。IP を用いた撮像時間は数分である。電源設備協会の依頼で行った。

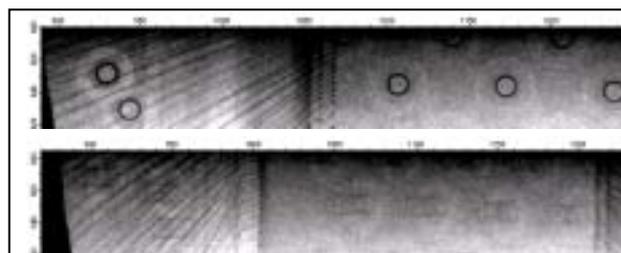


図 3 積層 LSI の 25 倍拡大像。貫通ピアとその

周りの電極が見える。(上)は、正面から見たとき、(下)は、35度横から見たときである。貫通ピアの深さ方向構造が見えている。

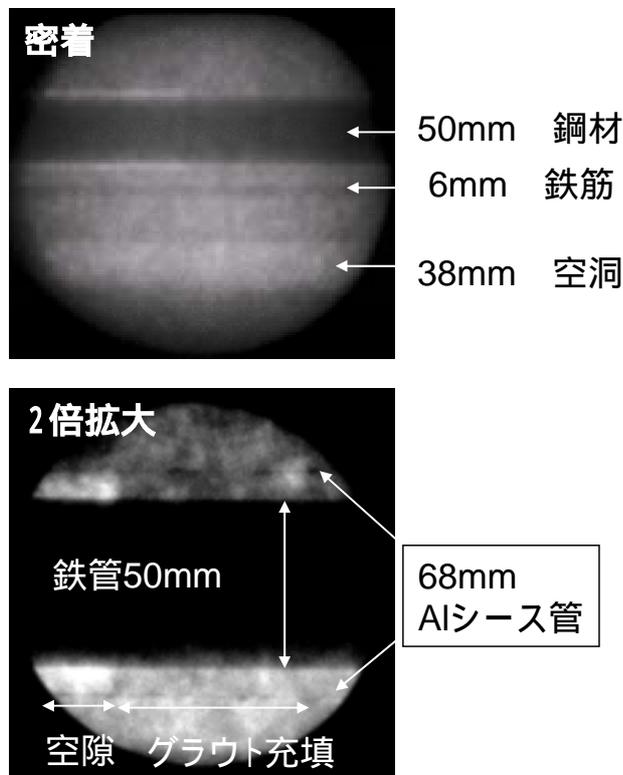


図4 60cm コンクリート(上段)に埋め込まれたシース管を CV4 で透視。(中段)は密着撮像、(下段)は2倍拡大像である。シース管は、1mm 厚のアルミでできており、中に鋼材とグラウトと呼ばれる充填材が入っている。鋼材がさびるのを保護する目的である。グラウトの充填状態を調べることと鋼材の切断状況を調べることが目的である。

3.2 高度分析利用

XAFS に対する需要が大きいが、しばらく前に“みらくる”を用いた XAFS のデモを行っているので本稿では述べない。追加事項として述べることは必要計測時間についてである。20SX を用いた時は約5時間を必要としたが、CV1 の低エネルギー強度が 100 倍向上したことにより、現在では、約3分で1つのスペクトルをとることができる。光学系をしっかりとデザインすれば、さらに高速にす

ることができる。我々の XAFS は分散型であり、早い現象の解明に優れていると思われる。

次に述べるのは、小角散乱実験の準備状況についてである。大型放射光では、ブロックコリメータを用いて約 0.1mm のビームを切り出して小角散乱実験や反射率測定を行っている。

これに対して、“みらくる”のソースサイズは、6 μ m を達成して 60 μ m 幅のビームを形成している。図5は、ビーム形成の様子である。コリメータの角度を調整しているところであるが、アライメントが不完全なときに W コリメータ表面からの反射光が確認される。角度を変えることにより、反射光の位置が変わり強度も変わる。反射 X 線強度はかなりの物である。しばらくして小角散乱実験を行うが、反射 X 線を使うのも一つの方法である。X 線エネルギーは約 30keV である。

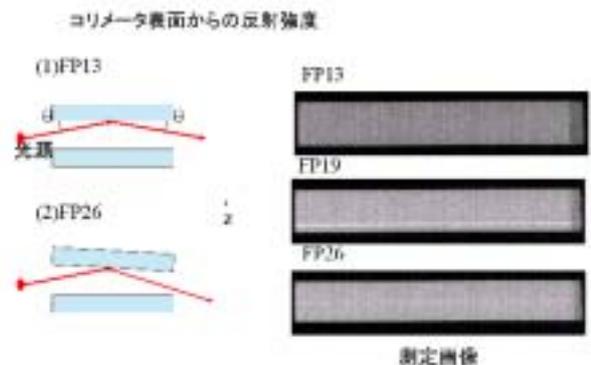
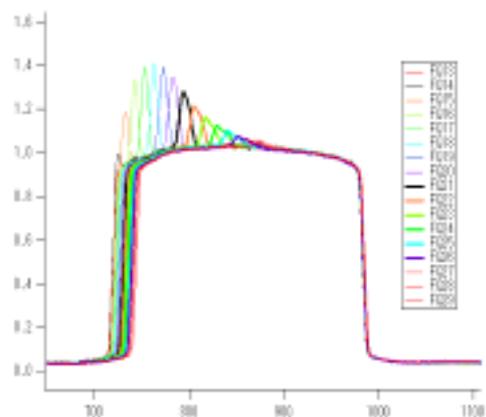


図5 (上段)ブロックコリメータを用いて



ファンビームを切り出している様子。コリメーションが不完全なとき、表面からの反射光が確認される。(下段)コリメータの角度を変えて、反射光が変化の様子を見ている。30keV までの X 線が反射されている。

以上、みらくる型放射光の現状を簡単に紹介したが、“みらくる”が、CV1 及び CV4 の完成により、非破壊検査装置及び高度分析装置として完成したことをご理解いただけたと思う。非破壊検査や CT、XAFS の委託分析を受け付けている。